干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j. issn. 1000 - 6060. 2019. 06. 13

科尔沁梯级生态带大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量间的尺度关系①

黄天宇[1,3]， 刘廷玺[1,2]， 李东方[1,2]， 段利民[1,2]， 王冠丽[1,2]

（1 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院，内蒙古 呼和浩特 010018； 2 内蒙古自治区水资源保护与利用重点实验室，内蒙古 呼和浩特 010018； 3 中国中铁二院工程集团有限责任公司，四川 成都 610031）

摘 要：利用2017年内蒙古科尔沁沙地梯级生态带上涡动相关仪和大孔径闪烁仪的观测数据，借助解析足迹模型计算的源区，探究荒漠化地区复杂下垫面上涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量之间的差异和关系。结果表明：不论哪个风向上，农田是占研究区LAS源区比重最大的下垫面类型；不同风向、不同下垫面种类上LAS源区面积、各站点涡动源区面积均不同；不同下垫面EC观测的显热通量(H)与LAS观测值相关性不同，各EC与LAS观测值间的R^2普遍偏低；H_{LAS}和$H_{EC聚合}$拟合程度较好，拟合系数为1.179 8，两者间具有较好的尺度相互转化关系。LAS观测数据偏大、能量闭合问题、非研究类型下垫面占比、数据的选择时段是影响二者相关性的原因。

关 键 词： 大孔径闪烁仪；涡度相关仪；显热通量；梯级生态带；气候学足迹

近地表水热通量在调节大气的能量平衡和驱动大气环流过程中起着关键的作用。当地表从太阳和大气吸收辐射能并重新分配成显热和潜热时，不同下垫面水热通量的再分配有差异[1]。因此不同尺度、不同下垫面上水热通量的研究一直是国内外学者的研究重点[2]。目前，较为成熟的通量观测方法已有很多，其中涡动相关仪（Eddy Covariance system，EC）可以准确测量单点尺度均一下垫面上的水热通量，大孔径闪烁仪（Large Aperture Scintillometer，LAS）能测量公里尺度上非均一下垫面区域水热通量。因此，对斑块和带状地表上涡动相关仪与大孔径闪烁仪测量值之间关系的研究是非常必要的[3]。国内外对探讨单点尺度与区域尺度通量观测值之间关系的研究还比较少，LAGOUARDE等[4]、CHEHBOUNI等[1]、卢俐等[3]分别在法国东南部小麦—裸地复合下垫面、墨西哥北部草地—豆科灌木复合下垫面和中国北京小汤山杂草—裸地复合下垫面上对EC和LAS的观测值进行了对比研究，结果均表明两者吻合较好；MEIJININGER等[5]在德国LITFASS复杂下垫面上对EC和LAS的源区进行了详细的研究，结果表明大孔径闪烁仪的源区观测值与多台涡动相关仪聚合得到的源区观测值相关性很好。此外，不同学者应用不同源区计算方法得到的EC和LAS源区观测值间相关性也不尽相同[6-9]，但尚未见到有关荒漠化地区复杂下垫面上EC与LAS源区的对比与尺度关系研究。

基于已有的研究，本文借助气候学足迹模型，结合自动气象站数据，研究了科尔沁沙地梯级生态带上大孔径闪烁仪与各下垫面上涡动相关仪观测显热通量的差异与相关性，为深入了解荒漠化地区水热通量传输和水分运移状况提供参考。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

研究区位于我国北方典型半干旱荒漠化地区科尔沁沙地的东南边缘（122°33′00″～122°41′00″E，43°18′48″～43°21′24″N），该区域受气候变化和人

① 收稿日期：2019 - 02 - 19； 修订日期：2019 - 05 - 24
基金项目：国家自然科学基金重点国际合作研究与交流项目(51620105003)；国家自然科学基金项目(51139002，51769020，51669017)；教育部创新团队发展计划(IRT_17R60)资助
作者简介：黄天宇(1994 -)，男，河北廊坊人，硕士研究生，研究方向为干旱区水热通量. E-mail：huangtyy@ foxmail. com
通讯作者：刘廷玺(1966 -)，男，内蒙古赤峰人，教授，博士，研究方向为干旱区生态水文. E-mail：txliu1966@ 163. com

类活动影响,下垫面存在较大的异质性。研究区土壤以风沙土为主,兼有栗钙土、黑钙土等土壤类型。地形总趋势西高东低,南北沙丘高,中部农田、沙质草甸和小型湖泊地势较低,植被多样,海拔 183 ~ 231 m,各种下垫面地形呈条带"阶梯状"分布,是典型的梯级生态系统。本次研究选取包括多个生态—气象—土壤环境监测站点在内的一条南北向梯级生态带进行研究,研究区概况如图 1 所示。

1.2 仪器与观测内容

梯级生态带内建有多个生态—气象—土壤环境监测站点,各站点常规设备包括四分量净辐射仪(NR-LITE2, Campbell Scientific, USA)、温湿度测量仪器(HMP155A, Campbell Scientific, USA)、风速风向测量仪器(03B, Campbell Scientific, USA)、土壤热通量板(HFP01sc, Campbell Scientific, USA)、多层位土壤探头(03B, Campbell Scientific, USA)、雨量筒(TE525MM, Campbell Scientific, USA)等传感设备。各站点从北至南依次为:半流动沙丘差巴嘎蒿群落(A4)、农田玉米地(BC4)、草甸芦苇群落(C4)、小型湖泊(E4)和半固定沙丘半灌木—杂草群落(F4)。其中 A4、C4 两站分别有一台固定涡动相关仪长期监测,另有一台移动涡动相关仪测定其余各站;A4—F4 为大孔径闪烁仪(BLS450, Scintec, German)观测带,F4 为 LAS 发射端,A4 为接收端。各站点相关介绍见表 1。

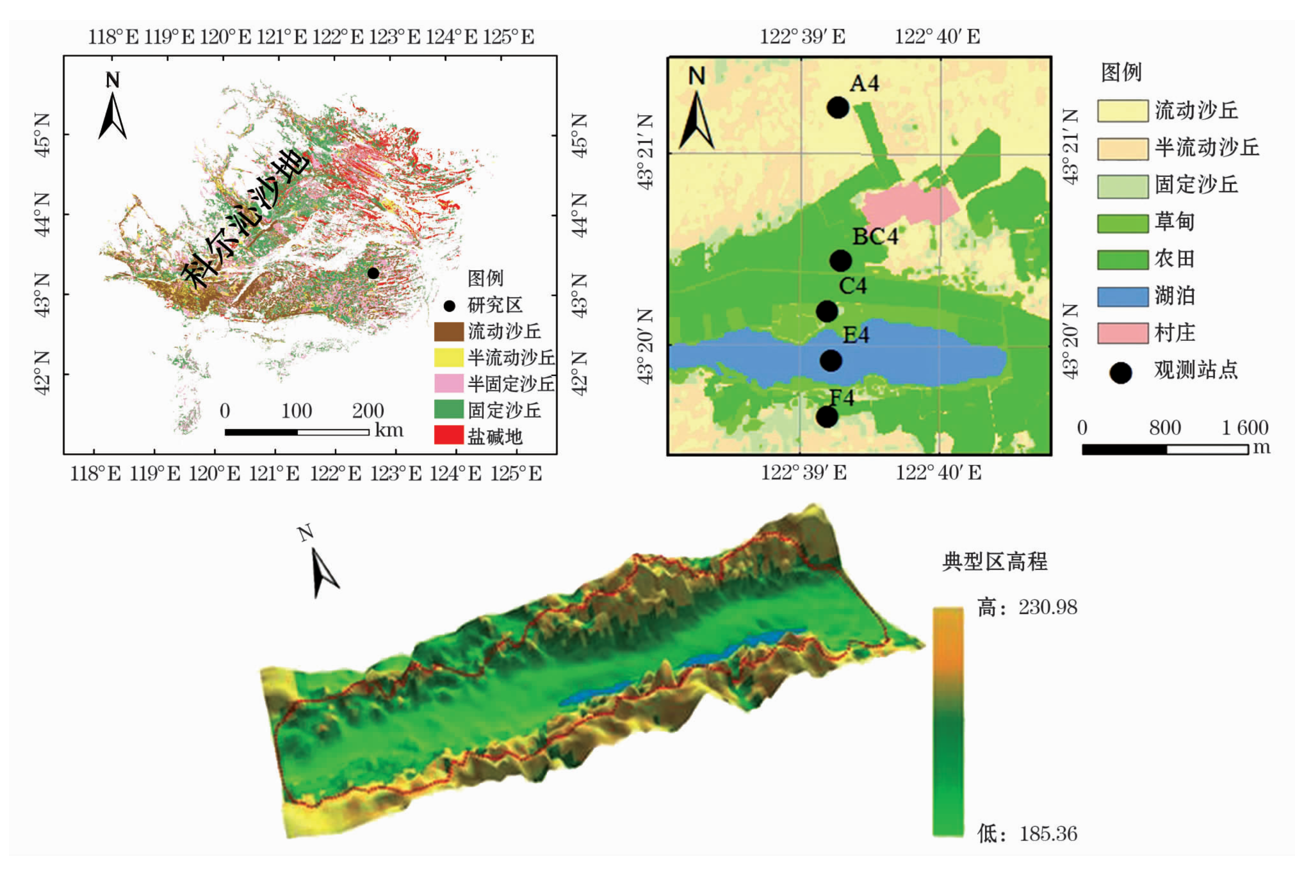


图 1 研究区及站点示意图

Fig. 1 Sketch map of the research area and the stations

表 1 研究区站点介绍

Tab. 1 Introduction of the stations

站点	地貌类型	植被群落	涡度放置时间	高程 / m	下垫面面积 / m^2	占研究区比例 / %
A4	半流动沙丘	差巴嘎蒿	2017 年 5 ~ 10 月	205	4 186 350	39.87
BC4	农田	玉米	2017 年 5 ~ 6 月	189	3 520 650	33.53
C4	草甸	芦苇—碱蒿	2017 年 5 ~ 10 月	184	649 950	6.19
E4	小型湖泊		2017 年 9 ~ 10 月	183	1 164 450	11.09
F4	半固定沙丘	半灌木—杂草	2017 年 8 ~ 9 月	201	820 050	7.81

1.3 研究方法与数据处理

1.3.1 通量源区足迹模型 综合单点观测的通量足迹函数和沿光程路径方向上的权重函数，可建立涡动相关仪和大孔径闪烁仪足迹模型的基本方程[10-12]：

$$fLAS(x',y',z_m) = \int_{x_1}^{x_2} W(x) f(x-x',y-y',z_m)\,dx \quad (1)$$

式中：x_1，x_2 分别代表 LAS 发射端和接收端的坐标；(x,y)表示光径上的点；(x',y')表示光径上的点的上风方向各点的坐标；z_m 为观测有效高度；$W(x)$为沿光径路线方向的权重函数；当计算 EC 源区时，$x_1=x_2$；模型输入参数包括 Obukhov 长度，摩擦速度，平均风速风向，侧向风速标准差，空气动力学粗糙度及有效高度等。本文计算区域大小为包括 LAS 发射端、接收端在内的 3 km×3.5 km 范围，网格分辨率设定为 10 m，观测有效高度为观测高度减去零平面位移。

本文参照蔡旭辉[12]开发的“flem 模式”，采用通量加权法进行长期通量观测的平均足迹计算。主要公式如下：

$$f_c(x,y,z_m) = \sum_{i=1}^{N} f^i(x,y,z_m)\frac{Flux(i)}{\sum_{i=1}^{N} Flux(i)} \quad (2)$$

式中：i 为时次序号；N 为计算时段内的总时次数；$f_c(x,y,z_m)$为气候学足迹；$f_i(x,y,z_m)$为 i 时次的足迹；$Flux(i)$为 i 时次的通量观测值。

1.3.2 数据处理 研究时段选定在白天湍流不稳定时段（9:00～16:00），所有数据经过数据的筛选、剔除、插补等过程获得 30 min 数据进行研究。其中，涡动相关数据用 Eddy Pro 软件进行系列校正计算[13-14]，大孔径闪烁仪数据通过迭代法进行系列计算[15]。将获得的 615 个样本按东（45°～135°）、南（135°～225°）、西（225°～315°）、北（315°～360°，0°～45°）4 个风向划分，分别得到 35、172、244、164 个样本，其中西风是主风向。数据整理与分析采用 Excel，SRun，Origin 和 ArcGIS 等软件处理。

将其余涡动相关仪测得的水热通量数据与同时段测得的净辐射数据建立回归方程。由于湖泊气象站缺乏湖泊各层位温度等气象数据，不能得到长序列水热通量与环境因子的回归关系，因此湖泊站点仅有观测时段的数据；经验证，各站点净辐射间相关性明显（$R^2>0.9$），因此通过 A4、C4 两站长序列观测数据校正站点数据，得到 BC4、F4 两站点稳定长序列显热通量[16-17]。此时得到涡动相关仪和大孔径闪烁仪的同步观测时段 2017 年 9 月 10 日～10 月 20 日数据。

2 结果与分析

2.1 不同下垫面上 EC 与 LAS 值的比较

将各风向上的 LAS 源区图与下垫面地形图叠合，得到各个风向上 LAS 源区范围内各下垫面类型的占比。以南风风向为例，见图 2。由图可知 LAS 源区南端边界在湖泊内。因此，湖泊南侧草甸和半固定沙丘下垫面不在源区范围内，其余各风向结果类似。各下垫面类型占源区比例如图 3 所示。

图 3 是研究区 4 个风向上不同下垫面源区占研究区源区情况。每个风向总贡献率为 100%。由图

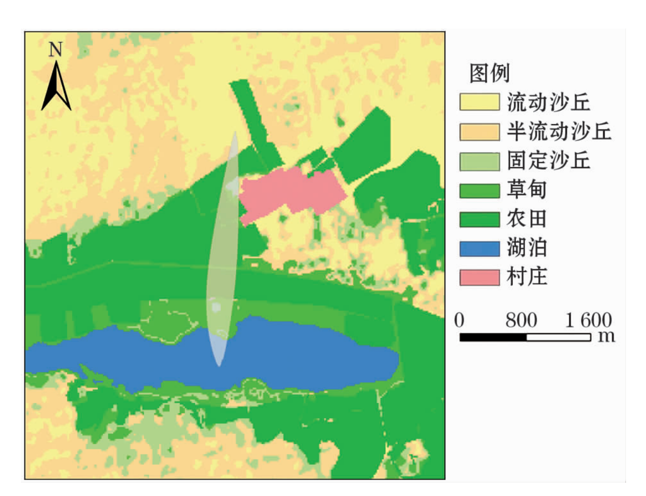


图 2 南风风向上 LAS 源区与下垫面叠合图

Fig. 2 Superposition of LAS source-area and underlying surface in south wind direction

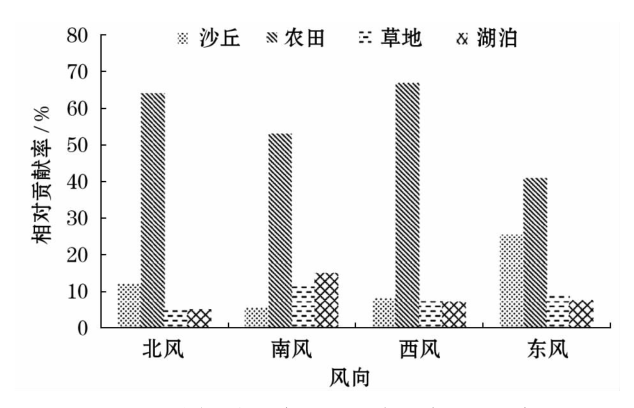


图 3 不同风向上各下垫面类型占源区比例

Fig. 3 Ratio of underlying surface types in different wind directions

可知,不论哪个风向上,农田是占 LAS 源区比最大的下垫面类型,在各风向上占比面积超过 40%。其中,西风风向时占比最大,为源区面积的 66.81%;沙丘下垫面在东风风向上占比较大,为 25.32%,在北风风向次之,在南风风向上占比最小,为 5.67%;湖泊在南风风向上贡献最大(14.98%),在北风风向上贡献最少(5.07%);草地下垫面在南风风向上占 LAS 源区比例最大,为 11.31%,其余风向上占比较小,均低于源区面积的 10%。

分别计算 4 个风向上 LAS 和各站点 EC 的源区,结果如图 4、表 2 所示。不同风向、不同下垫面上 LAS 源区面积和各站点涡动源区面积均不同。不论在哪一风向上,A4、F4 两站涡动观测源区均在 LAS 源区外;东风风向上仅 BC4 和 E4 点有少部分 EC 源区在 LAS 源区内,其余各涡动点源区在此风向上均与 LAS 源区不重合;西风、北风和南风三个风向上,草甸地 C4 站涡动源区面积和足迹权重占比 > 农田 BC4 站 > 湖泊 E4 站。具体数据见表 2。

将各站点涡动相关仪观测的显热通量(H)分别与 LAS 观测值进行拟合分析,结果如表 3 所示。由表可知,不同下垫面 EC 观测的 H 与 LAS 观测值相关性不同。除东风风向上 C4 点 EC 值与 LAS 观测值相关性较好($R^2=0.863$)外,其余各 EC 与 LAS 观测值间的 R^2 普遍偏低。由图 4 和表 2 的数据可知,东风风向上源区重叠性较低,故尽管此时 R^2 较大,该风向拟合曲线代表性较低;各风向上涡度相关仪与 LAS 观测值之间散点较多,$R^2<0.65$。尽管相关性普遍不高,但 4 个风向上位于 LAS 光径中段的 BC4(农田)和 C4(草甸)两种下垫面较其余下垫面类型与 LAS 观测值的拟合相关性高;由于湖泊表面显热变化规律与其余各下垫面类型显热变化规律不同,因此 E4 站观测值与 LAS 观测值间相关性最低。总的来说,结合表 2 和图 4 除东风风向外,其余三个风向上 EC 源区面积与 LAS 源区重叠面积权重比例

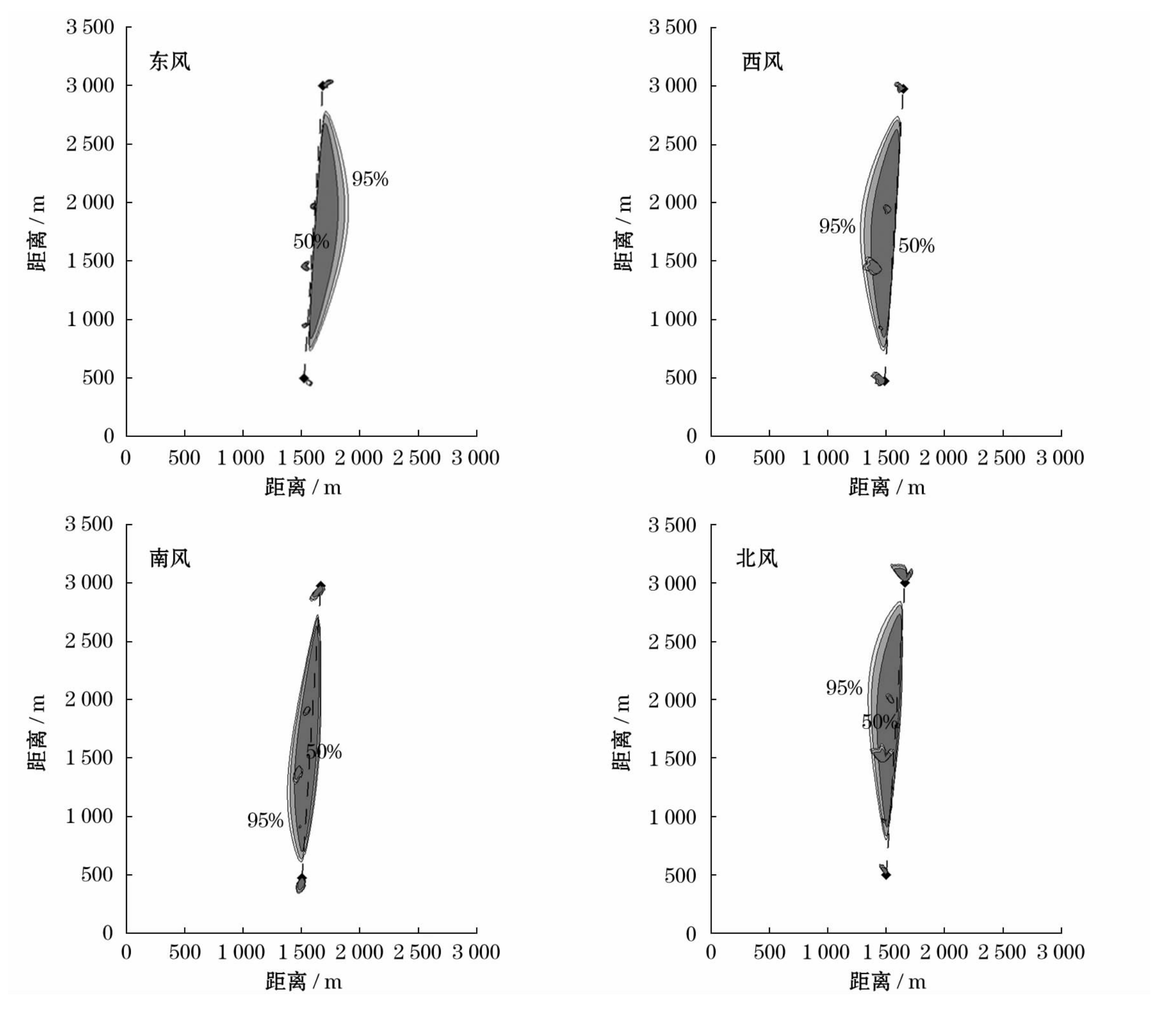


图 4　各风向上 LAS 和各站点 EC 的源区

Fig. 4　Source regions of LAS and EC at each wind direction

表 2　各站点源区分布

Tab. 2　Source area distribution of each station

仪器	风向	源区面积 / m²	重叠面积 / m²	足迹权重 / %	仪器	风向	源区面积 / m²	重叠面积 / m²	足迹权重 / %
A4 站 EC	东风	8 542	0	0	E4 站 EC	东风	5 737	892	0.25
	南风	16 065	0	0		南风	2 805	2 805	0.83
	西风	10 072	0	0		西风	4 080	4 080	1.08
	北风	25 500	0	0		北风	4 207	3 952	1.09
BC4 站 EC	东风	5 482	530	0.43	F4 站 EC	东风	5 737	0	0
	南风	7 522	7 522	2.23		南风	13 515	0	0
	西风	8 287	8 287	2.19		西风	15 045	0	0
	北风	7 777	7 777	2.14		北风	8 542	0	0
C4 站 EC	东风	8 542	0	0	LAS	东风	359 294	359 294	100
	南风	15 172	15 172	4.50		南风	337 747	337 747	100
	西风	23 077	23 077	6.09		西风	378 674	378 674	100
	北风	27 412	26 392	7.21		北风	363 502	363 502	100

表 3　各风向上 LAS 与 EC 间观测值的拟合

Tab. 3　Correlations between LAS and EC in different wind directions

	东风		南风		西风		北风	
A4	$H_{EC}=0.513H_{LAS}$	$R^2=0.468$	$H_{EC}=0.699H_{LAS}$	$R^2=0.201$	$H_{EC}=0.504H_{LAS}$	$R^2=0.190$	$H_{EC}=0.751H_{LAS}$	$R^2=0.478$
BC4	$H_{EC}=0.726H_{LAS}$	$R^2=0.563$	$H_{EC}=0.642H_{LAS}$	$R^2=0.423$	$H_{EC}=0.517H_{LAS}$	$R^2=0.347$	$H_{EC}=0.773H_{LAS}$	$R^2=0.613$
C4	$H_{EC}=1.002H_{LAS}$	$R^2=0.863$	$H_{EC}=0.849H_{LAS}$	$R^2=0.356$	$H_{EC}=0.813H_{LAS}$	$R^2=0.333$	$H_{EC}=0.999H_{LAS}$	$R^2=0.547$
E4	$H_{EC}=0.176H_{LAS}$	$R^2=0.160$	$H_{EC}=0.284H_{LAS}$	$R^2=0.148$	$H_{EC}=0.136H_{LAS}$	$R^2=0.081$	$H_{EC}=-0.087H_{LAS}$	$R^2=0.029$
F4	$H_{EC}=0.671H_{LAS}$	$R^2=0.526$	$H_{EC}=0.515H_{LAS}$	$R^2=0.345$	$H_{EC}=0.505H_{LAS}$	$R^2=0.323$	$H_{EC}=0.699H_{LAS}$	$R^2=0.615$

大时，两种仪器观测值间相关性好。

2.2　非均一下垫面上聚合 EC 与 LAS 观测的 *H* 值的比较与拟合

由 2.1 的分析可知，各站点 EC 观测值与 LAS 观测之间不存在简单的算术平均关系。需要考虑重叠区域权重比值以及各风向源区[8]。本研究首先确定各观测时刻 EC 的源区分布，对各 EC 观测的源区下垫面显热通量进行赋权计算，最后与 LAS 观测值进行拟合，寻找两者的相关性[18]。

由图 5 可知，观测时段内 LAS 发射端源区边界仍落在湖泊内，所以，湖泊南侧半固定沙丘半灌木—杂草下垫面不在源区内。

在 LAS 通量源区内各涡度站点观测区域的通量源区百分比的计算公式如下：

$$f_n = sum_LAS_n/(sum_LAS_1+\cdots+sum_LAS_n)\quad(3)$$

式中：*sum_LAS_n* 是 *LAS* 观测通量源区在 *n* 个区域内足迹值总合。

对各点涡动相关仪和大孔径闪烁仪的足迹权重进行统计，结果如表 4 所示。

由表4可知，在研究时段内，C4站点EC的足

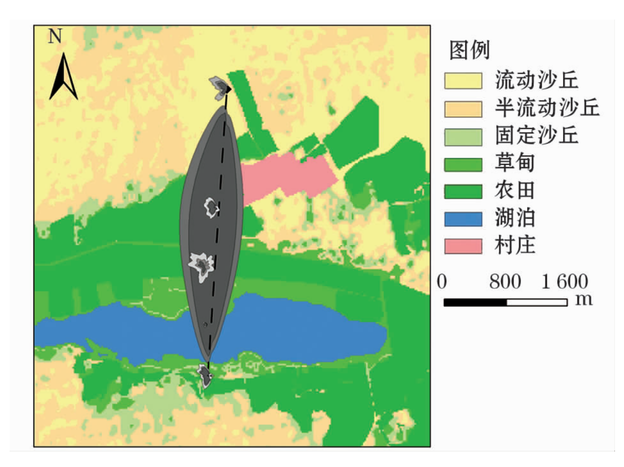


图 5　LAS、EC 源区与下垫面叠合图

Fig. 5　Superposition of LAS and EC source-areas and underlying surface

表 4　各站点源区占比情况 / %

Tab. 4　Source area ratio of each station / %

仪器	足迹权重	下垫面占 LAS 源区比
A4 站 EC	0	18.86
BC4 站 EC	3.13	44.18
C4 站 EC	6.15	14.60
E4 站 EC	0.66	17.16
F4 站 EC	0	0
LAS	100	100

迹权重是各站 EC 权重占比中最大的,A4、F4 两站涡动源区与 LAS 源区不重叠;农田是 LAS 源区内贡献面积最大的下垫面种类,半流动沙丘下垫面其次,然后是湖泊,草甸下垫面占比最低。

图 6 为 H_{LAS} 和 $H_{EC聚合}$ 的相关关系。由图可知,H_{LAS} 和 H_{EC} 拟合程度较好,拟合系数为 1.179 8, H_{LAS} 值略大于 $H_{EC聚合}$,两者间具有较好的尺度相互转化关系。

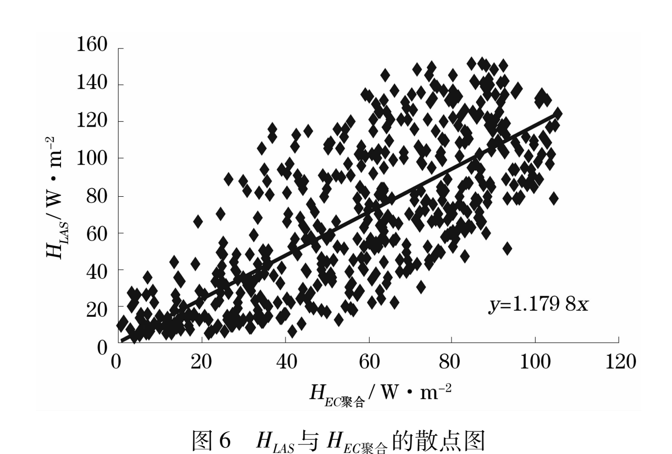


图 6 H_{LAS} 与 $H_{EC聚合}$ 的散点图

Fig. 6 Scatter plot of H_{LAS} and $H_{source\text{-}area}$

3 讨 论

对研究区及研究区内不同下垫面气候学足迹的分析可以准确了解不同时刻涡动相关仪与大孔径闪烁仪观测显热通量之间的差异与关系。本文研究表明,不同站点源区的面积大小和位置与风向有关,各站点涡动相关仪观测显热通量与大孔径闪烁仪观测值之间相关性不同,但 R^2 普遍较低。这是因为各涡动站点观测通量值仅能代表其所在下垫面的显热变化,而研究区为典型的梯级生态带,下垫面不均一,因此单个涡动相关仪观测的通量不能代表整个研究区的通量变化情况,两者相关性较低。但研究发现,位于 LAS 光径中段的 BC4(农田)和 C4(草甸)两种下垫面较其余下垫面类型与 LAS 观测值的拟合相关性高。这是因为此两种下垫面位于 LAS 光径中段,HILL 等[19]的研究表明,位于大孔径闪烁仪光径中段的下垫面具有更高的权重。因农田下垫面与草甸下垫面位于光径中段,加之下垫面占比也较大,故其与 LAS 观测值的拟合效果较其余下垫面好,但它们不能代表整体非均一下垫面,故 R^2 不高。

本文得到的 H_{LAS} 略大于 $H_{EC聚合}$,这与 MEIJININGER 等[5]在德国 LITFASS 复杂下垫面上观测结果一致。MEIJNINGER 等[5]的研究表明,非均一下垫面研究区内,LAS 观测的显热通量值会因温度结构参数 C_T^2 与 H 间的非线性关系而偏大,且 EC 观测值会因下垫面异质性及地形等原因造成的能量不闭合而偏低。本文所在研究区是典型的梯级生态带,下垫面异质性较大且不同下垫面种类间高程变化较大,加之前人对本研究区各下垫面类型能量闭合度的研究[20-21]显示,本地区能量闭合度较低,导致研究区 LAS 观测显热通量值大于聚合各下垫面 EC 得到的 H 值。但也有研究表明非均一下垫面上测得的 H_{LAS} 略小于 $H_{EC聚合}$[3,8,18,22],这些研究区尽管同为复杂下垫面,但研究区地势较为平缓, 各下垫面类型能量闭合度较高,涡度测量值较为准确。故 H_{LAS} 略小于 $H_{EC聚合}$。

对本研究的研究时段进行分析。研究时段内研究区处于植被生长末期,9 月下旬研究区牧民打草,农作物收割,草甸和农田下垫面变化较大;进入 10 月,自然生植被逐渐凋零枯萎,LAS 源区面积较 9 月时有所扩大。本文发现研究时段内农作物未收割时的数据拟合效果优于收割后的数值拟合,作物收割前时段 H_{LAS} 与 $H_{EC聚合}$ 的拟合系数为 1.059 4,优于整体数据的 1.179 8;对研究区进行分析。研究区地形条件复杂,南北跨度较大且呈梯级分布,研究时段内受地形和地理位置的影响,不同气象站间日出、日落的时刻不同。本文选择研究时段内 9:00 ~ 16:00 数据作为湍流不稳定时段进行研究,但分析数据发现个别站点 9:00、15:30、16:00 的数据处于湍流稳定时段。剔除这些数据后 H_{LAS} 与 $H_{EC聚合}$ 的拟合系数由整体的 1.179 8 变为 1.087 5,拟合效果变好;此外,某些时刻源区内还会有少量其余下垫面占比,如村庄、道路等,晴天时的拟合效果低于多云天气的拟合效果,控制这些因素可以不同程度的提高 H_{LAS} 与 $H_{EC聚合}$ 拟合关系。剔除所有可能影响 H_{LAS} 与 $H_{EC聚合}$ 的因素后,两者的拟合系数变为 1.029 6,相关性较好。还有研究表明[3,18],LAS 源区内各涡动站点代表的下垫面源区权重因素除考虑面积外,还应考虑涡度在 LAS 光径上的位置,并据此提出了优化 LAS 与 EC 聚合值间的计算公式。结果表明,考虑涡度在 LAS 光径上的位置能提高两者间的相关性。

4 结 论

本文利用一台大孔径闪烁仪和多台涡动相关仪

对科尔沁沙地一条梯级生态带进行水热通量的数据观测，通过源区足迹模型对复杂下垫面上涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测显热通量的转换关系进行了研究。结论如下：

（1）不同风向、不同下垫面种类上 LAS 源区面积、各站点涡动源区面积均不同；

（2）不同下垫面上 EC 观测的显热通量（H）与 LAS 观测值相关性不同且相关性较低，单台涡动相关仪观测通量值不能代表梯度带的整体水平；

（3）H_{LAS} 和 $H_{EC聚合}$ 拟合程度较好，拟合系数为 1.179 8，两种仪器观测显热通量具有较好的尺度相互转化关系。LAS 观测数据偏大、能量闭合问题、非研究类型下垫面占比、数据的选择时段等因素是二者相关性的影响因素。

参考文献（References）

[1] CHEHBOUNI A, KERR Y H, WATTS C, et al. Estimation of area-average sensible heat flux using a large-aperture scintillometer during the Semi-Arid Land-Surface-Atmosphere (SALSA) experiment [J]. Water Resources Research, 1999, 35(8): 2505 – 2511.

[2] BALDOCCHI D, FALGE E, GU L H, et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities [J]. Bulletin of the American Meteorological Society. 2001, 82(11): 2415 – 243.

[3] 卢俐，刘绍民，徐自为，等. 大孔径闪烁仪与涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系[J]. 地球科学进展，2010，25（11）：1273 – 1282. [LU Li, LIU Shaomin, XU Ziwei, et al. The scale relationship of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance system [J]. Advances in Earth Scince, 2010, 25(11): 1273 – 1282.]

[4] LAGOUARDE J P, BONNEFOND J M, KERR Y H, et al. Integrated sensible heat flux measurements of a two-surface composite landscape using scintillometry [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105: 5 – 35.

[5] MEIJNINGER W M L, BEYRICH F, LUDI A, et al. Scintillometer-based turbulent fluxes of sensible and latent heat over a heterogeneous land surface: A contribution to litfass-2003 [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 121: 89 – 110.

[6] BEYRICH F, LEPS J P, MAUDER M, ET AL. Area-averaged surface fluxes over the Litfass region based on eddy-covariance measurements [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121: 33 – 65.

[7] BEYRICH F, DE BRUIN H A R, MEIJNINGER W M L, et al. Results from one year continuous operation of a large aperture scintillometer over a heterogeneous land surface [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105: 85 – 97.

[8] 彭谷亮，刘绍民，蔡旭辉，等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析[J]. 大气科学，2008，32（5）：1064 – 1070 [PENG Guliang, LIU Shaomin, CAI Xuhui, et al. Footprint analysis of turbulent flux measurement over heterogeneous surface [J]. Chinese Journal of Atmospheric Scinces, 2008, 32(5): 1064 – 1070.]

[9] MAHRT L, VICKERS D, SUN J, et al. Calculation of area-averaged fluxes: Application to Boreas [J]. Journal of Applied Meteorology, 2001, 40: 915 – 920.

[10] KORMANN R, MEIXNER F X. An analytic footprint model for non-neutral stratification [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2001, 99: 207 – 224.

[11] MEIJNINGER W M L. Surface fluxes over natural landscape using scintillometry [M]. Wageningen: Wageningen University and Research Centrum, 2003, ISBN 90 – 5808 – 885 – 5.

[12] 蔡旭辉. 湍流微气象观测的印痕分析方法及其应用拓展[J]. 大气科学，2008，32（1）：125 – 134. [CAI Xuhui. Footprint analysis in micrometeorology and its extended applications [J]. Chinese Journal of Atmospheric Scinces, 2008, 32(1): 125 – 134.]

[13] LI-COR Biosciences. Eddy Pro 4.0: Help and User's Guide [M/OL]. Lincoln, NE, 2012: 208. http://envsupport.licor.com/help/EddyPro4/Default.htm. .

[14] BURBA G G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates [R]. Lincoln: LI-COR Biosciences, 2013: 178 – 250.

[15] 白洁，刘绍民，丁晓萍，等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究[J]. 地球科学进展，2010，25（11）：1148 – 1165. [BAI Jie, LIU Shaomin, DING Xiaoping, et al. A study of the processing method of large aperture scintillometer observation data [J]. Advances in Earth Scince, 2010, 25(11): 1148 – 1165.]

[16] XU Z W, LIU S M, XU T R, et al. Comparison of the gap filling methods of evapotranspiration measured by eddy covariance system [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(4): 372 – 381.

[17] 王婧，刘廷玺，雷慧闽，等. 基于涡度相关的半干旱区沙丘 – 草甸水热通量对比分析[J]. 干旱区研究，2016，33（3）：593 – 600. [WANG Jing, LIU Tingxi, LEI Huimin, et al. Heat and water vapor fluxes of dune-meadow landscape in semiarid area based on eddy covariance measurements [J]. Arid Zone Research, 2016, 33(3): 593 – 600.]

[18] 张劲松，孟平，郑宁，等. 大孔径闪烁仪法测算低丘山地人工混交林显热通量的可行性分析[J]. 地球科学进展，2010，11（25）：1283 – 1290. [ZHANG Jinsong, MENG Ping, ZHENG Ning, et al. The feasibility of using LAS measurements of the sensible heat flux from a mixed plantation in the hilly zone of the north China [J]. Advances in Earth Science, 2010, 11(25): 1283 – 1290.]

[19] HILL R J, BOHLANDER R A, CLIFFORD S F, et al. Turbulence-induced millimeter-wave scintillation compared with micrometeorological measurements [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 26(3): 330 – 342.

[20] 王丹，刘廷玺，张圣微，等. 流动沙丘涡度相关通量的坐标旋转订正与对比研究[J]. 干旱区地理，2017，40（5）：1038 – 1046.

[WANG Dan, LIU Tingxi, ZHANG Shengwei, et al. Comparison of coordinate rotation correction methods for eddy covariance flux over mobile dune[J] Arid Land Geography, 2017, 40(5): 1038 - 1046.]

[21] 李辉东,关德新,袁凤辉,等.科尔沁温带草甸能量平衡的日季变化特征[J].应用生态学报,2014,25(1):69 - 76.[LI Huidong, GUAN Dexin, YUAN Fenghui, et al. Diurnal and seasonal variations of energy balance over Horqin meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(1): 69 - 76.]

[22] MEIJNINGER W M L, HARTOGENSIS O K, KOHSIEK W. Determination of area-averaged sensible heat fluxes with a large aperture scintillometer over a heterogeneous surface-flevoland field experiment[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2002, 105 (1): 37 - 62.

Scale relationship of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance system in Horqin cascade ecological zone

HUANG Tian-yu[1], LIU Ting-xi[1,2], LI Dong-fang[1,2], DUAN Li-min[1,2], WANG Guan-li[1,2]

(1 *Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*;
2 *Inner Mongolia Key Laboratory of Water Resource Protection and Utilization, Hohhot* 010018, *Inner Mongolia, China*;
3 *China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu* 610031, *Sichuan, China*)

Abstract: With the observed flux data by Eddy Covariance System (EC) and Large Aperture Scintillometer (LAS) on the Cascade Ecological Zone of Horqin Sandy Land in Inner Mongolia, China in 2017, and based on the analytical footprint model, the scale relationship of sensible heat flux between EC and LAS measurement in complex underlying surface in desertification area was analyzed. The results showed that farmland is the largest proportion of the LAS source area in the study area regardless of wind direction. The area of LAS source area and the EC area of different stations are different from different wind direction and different underlying surface types. The correlations between H_{LAS} and H_{EC} on different underlying surfaces are different, and all of the correlation coefficient are relative low. H_{LAS} and $H_{source\text{-}area}$ were well fitted and the correlation coefficient was 1.179 8. There was a good scale-to-scale relationship between them. The state that LAS observation data are larger than the real values, and the energy closure problem, the proportion of underlying surface of non-research type and the time period of data selection are the factors affecting their correlation.

Key words: large aperture scintillometer; eddy covariance system; sensible heat fluxes; cascade ecological zone; footprint climatology.